

杭基礎の水平抵抗メカニズムに関する解析的研究

栗田研究室

4107087 藤田 高崇

1. 研究背景・目的

杭基礎は広がりのある 3 次元の地盤に打設されており、解析は 3 次元で行われることが理想である。しかし、地盤の非線形性状を考慮した解析モデル構築を考えると解析が複雑化するため、杭基礎設計に杭-地盤連成系非線形 3 次元問題を応用することは困難だと考えられる。

一般的には 3 次元の杭-地盤系を 2 次元の杭-地盤バネ系に置換する弾性支承梁としての杭基礎の解析法がある。

弾性支承梁モデルの基本方程式は、

$$\frac{d}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 y}{dx^2} \right) + pB = 0 \quad \dots (1)$$

このとき、杭の曲げ剛性を EI、x は深さ、y は杭基礎の水平変位、p は地盤反力、B は杭幅を表す。今、地盤反力が杭基礎の水平変位に比例し、その比例定数（地盤反力係数と呼ばれる）および杭基礎の曲げ剛性 EI が深さによらず一定とすると式(1)は次のようになる。

$$\frac{d}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 y}{dx^2} \right) + k_h B y = 0 \quad \dots (2)$$

ここに、 k_h は水平地盤反力係数と呼ばれ、杭基礎の地盤連成挙動を把握するのに重要な数値となる。

既往研究において、中井¹⁾により一様な地盤に設置された単杭の水平載荷試験を、3 次元弾塑性 FEM 解析により評価した報告がある。3 次元弾塑性 FEM 解析を通して、杭頭荷重-変位関係・杭頭変位 0.01m 時の杭基礎の深さ方向における変位分布を推定している。

本研究では、FEM 解析によって杭頭荷重-変位関係・杭頭変位 0.01m 時の深さ方向の杭基礎の変位分布を求め、2 次元モデルと 3 次元モデルの解析結果の違いや、地盤モデルの弾性・弾塑性による解析結果の違いについて考察を行い、杭基礎の設計法に関する基礎的な研究を行う。

2. FEM 解析

2.1. 解析概要

一様な地盤に設置した単杭基礎に対し、水平荷重を杭頭に加える。解析モデルは 2 次元及び 3 次元の FEM モデルを構築し、地盤が弾性・弾塑性の条件で解析を行う。

2.2. 解析モデル

解析モデルは文献 1 のモデルに基づいて作成している。文献 1 のモデル概要を表-1 に示す。3 次元モデルは文献 1 の 1/2 モデルを採用した。

2 次元モデル、3 次元モデルはそれぞれ図-1 に示す。2 次元モデルは四角形 1 次要素、3 次元モデルは 3 次元ソリッド 2 次要素を使用し、メッシュモデルを作成している。

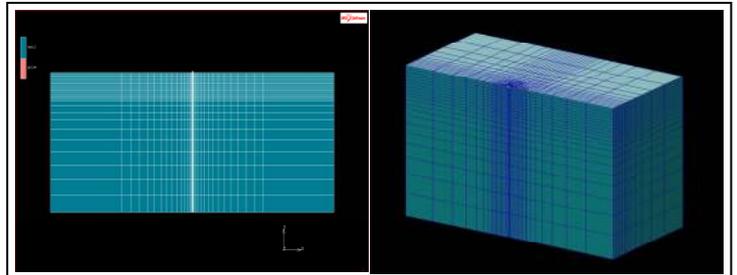


図-1 メッシュモデル(左:2次元 右:3次元)

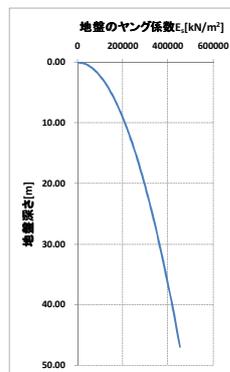


図-2 ヤング係数

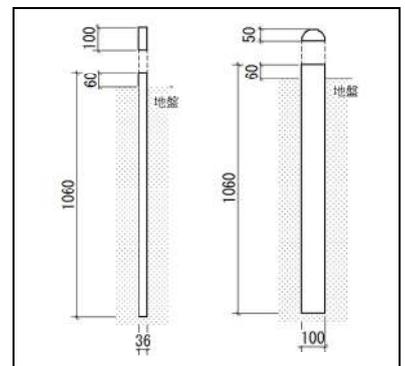


図-3 杭基礎の平面・断面図(左:2次元 右:3次元)

表-1 文献 1 のモデル概要(左:杭基礎 右:地盤)

杭種	鋼管杭	土質	乾燥砂 (密度 1.49 × 10 ³ kg/m ³)
寸法	直径 1m、厚さ 0.01m、長さ 10m	構成則	Mohr-coulomb
構成則	弾性	強度定数	φ = 39° c = 0
杭頭条件	回転拘束	弾性定数	V _s = 65.6 σ _v ^{0.25} [m/s]
		ポアソン比	0.35

表-2 杭基礎・地盤の概要(左:杭基礎 右:地盤)

	2次元	3次元		2次元	3次元
寸法			寸法	60 × 50 × 1	60 × 50 × 30
ヤング係数 [kN/m ²]	2.0 × 10 ⁸	7.9 × 10 ⁸	密度 ρ [kg/m ³]	1.49 × 10 ³	
ポアソン比	0.3		ポアソン比	0.35	
構成則	弾性		強度定数	内部摩擦角 φ = 39° 粘着力 c = 0	
寸法 [m]	図-3	図-3	弾性係数	V _s = 65.6 σ _v ^{0.25} [m/s] σ _v = ρ g z / 1000 [kN/m]	

解析精度はメッシュの細かさに影響するため、杭基礎近傍はメッシュを細かくし、杭基礎から離れるほどメッシュを荒く設定している。2 次元モデルを見ると地盤側面に大きな要素がある。これは半無限要素といい、これを地盤側面に付けることで、地盤が無制限まで拡大され、地盤側面に変形の影響を出ないようにした。杭基礎・地盤の概要は表-2 に示す。表-2 の地盤の弾性係数より、(3) 式から地盤のヤング係数を算出し、図-2 に示す。杭基礎の平面・断面図は図-3 に示す。

$$E = 2(1 + \nu) \times p \times V_s^2 \quad \dots (3)$$

3次元モデルの杭基礎は、直径 1m、板厚 0.01m の半鋼管と直径 1m の半円柱の曲げ剛性が同一となるように、半円柱のヤング係数を設定する。2次元モデルの杭は、直径 1m、板厚 0.01m の鋼管と長方形の縦 1m の曲げ剛性が同一となるように、長方形の横の辺を設定する。半円管、円管のヤング係数は、 $E=2.0 \times 10^8$ [kN/m²] である。地盤の構成則は、Drucker-Prager の降伏基準 f と

$$f = -\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \quad \dots (4)$$

関連流れ即 (塑性ポテンシャルは Drucker-Prager の式) を使用する。強度定数 α と k は、平面保持条件下で Mohr-coulomb 式と f が同一となる条件式 (文献 2 より)

$$\alpha = \frac{\tan \varphi}{\sqrt{3}} \quad k = \frac{3c}{\sqrt{3}} \quad \dots (5)$$

から算出。 φ 、 c は表-2 の強度定数である。

2.4. 荷重・境界条件

2次元の境界条件について、地盤底面は $x \cdot y$ 方向を拘束した。地盤側面は $x \cdot y$ 方向を自由とした。杭頭は回転拘束つまり、 x 方向を自由、 y 方向を拘束した。

3次元の境界条件について、地盤底面は $x \cdot y \cdot z$ 方向を拘束した。モデルの対称面は、面と垂直な方向の変位を拘束した。それ以外の面は、自由とした。

2次元の荷重条件について、図-4 の左図のように杭頭の中心にある節点に水平方向の集中荷重を加える。

3次元の荷重条件は、図-4 の右図のように、載荷用特殊部材を杭頭上部に付け、載荷用特殊部材の中心にある節点に水平方向の集中荷重を加える。また、載荷用特殊部材の上側水平面は鉛直方向の変位を拘束。特殊部材は変形が無視できるようにヤング係数を杭の 100 倍とし、厚さが 0.1m である。載荷用特殊部材を付けたのは、3次元モデルは杭頭に多くの節点があり、1つの節点に集中荷重を加えても、その他の節点が同一に変位しない可能性があるがあるので、3次元モデルの杭頭に載荷用特殊部材を付けた。

3. 解析結果

杭頭荷重-杭頭の水平変位関係を図-5 に示す。また、杭頭変位 0.01m 時における杭基礎の深さ方向の変位分布を図-6 に示す。図-6 において、原点よりも上に目盛線があるのは、杭頭が地上から +0.6m の位置にあるからである。図-3 を見ると、杭頭が突出しているのがわかる。

4. 解析結果の比較

図-5 の 2次元弾性 FEM と 3次元弾性 FEM を比較すると、2次元の剛性は 6.9×10^4 [kN/m]、3次元の剛性は 14.7×10^4 [kN/m] となり、3次元の剛性の方が 2次元の剛性より、約 2 倍大きい結果となった。また、図-6 の 2次元と 3次元を比較しても、3次元の方が、剛性が大きく出ている。これより、地盤が弾性・弾塑性に関わらず、剛性は 2次元より 3次元の方が大きくなっていることがわかる。また、図-6 から、2次元モデルと 3次元モデルの杭基礎の変位分布は異なった結果になっている。特に、深さが 4m 付

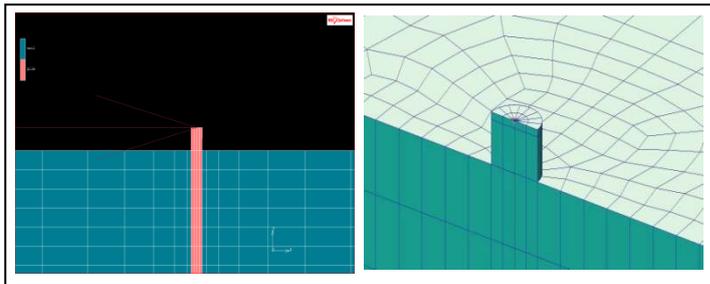


図-4 集中荷重点の位置 (左: 2次元 右: 3次元)

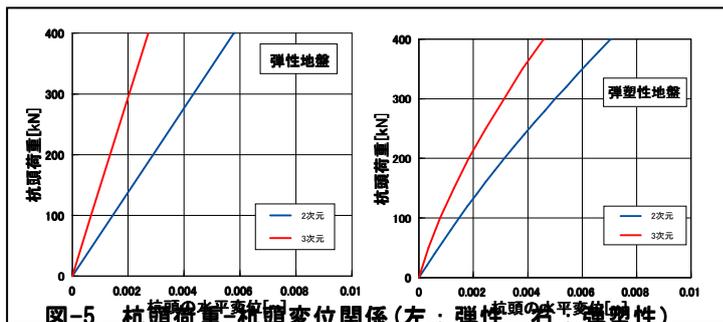


図-5 杭頭荷重-杭頭変位関係 (左: 弾性 右: 弾塑性)

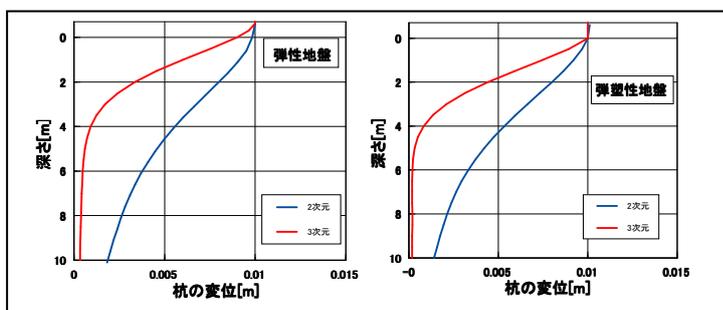


図-6 杭基礎の深さ方向の変位分布 (左: 弾性 右: 弾塑性)

近の杭基礎の変位が大きく異なっている。深さが 4m 付近で、杭基礎が大きく曲がっていることがわかる。

5. まとめ

一様な地盤に設置された単杭の杭頭に水平力を加えた場合を、FEM を用いて 2次元弾性・弾塑性モデルと 3次元弾性・弾塑性モデルで解析した。

解析結果から、地盤モデルが弾性・弾塑性に関わらず、2次元モデルより 3次元モデルの剛性が大きくなっていることが確認できた。このことは、3次元モデルにおける奥行方向成分の地盤性状が影響していることが考えられる。また杭基礎の深さ方向変位分布から、深さ 4m 付近までの変位性状に大きな変化が見られることが分かった。

今後、FEM 解析によって、地盤のひずみ分布を求め、地盤の非線形性状を研究していく。

参考文献

- 1) 中井正一、杭の水平積載試験と設計、基礎工、2010.6
- 2) 弾塑性有限要素法がわかる、地盤工学会